

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.02.005

# 水田双向修筑埂机设计与试验

王金峰<sup>1</sup> 翁武雄<sup>1</sup> 刘俊麟<sup>1</sup> 王金武<sup>1</sup> 莫毅松<sup>2</sup> 那明君<sup>1</sup>

(1. 东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030; 2. 常州汉森机械有限公司, 常州 213033)

**摘要:** 为提高筑埂作业效率与质量,减轻作业劳动强度,解决水田田埂拐角处无法机械筑埂的问题,设计了一种旋耕和镇压部件可180°水平回转的水田双向修筑埂机。阐述了关键部件横向偏移机构与180°水平回转调节机构的结构及工作原理。建立横向偏移机构和180°水平回转调节机构运动模型,通过运动学分析,获得了可满足不同作业条件下偏移要求的运动部件结构参数,得出旋耕和镇压部件回转过程趋于稳定的条件。对水田双向修筑埂机进行田间作业性能试验,试验结果表明:当作业速度分别为1.5、2.0、2.3 km/h时,田埂坚实度平均值随筑埂后间隔时间的增大而增大,田埂坚实度变异系数随筑埂后间隔时间的增大而减小;间隔时间相同时,埂侧坚实度平均值高于埂顶,田埂各测量位置稳定值均不低于1 332 kPa。前行与倒行两种作业方式所筑田埂均满足水田筑埂农艺要求。

**关键词:** 水田; 修筑埂机; 回转调节; 横向偏移

中图分类号: S224.1\*5 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2019)02-0040-09

## Design and Experiment of Bi-directional Ridger for Paddy Field

WANG Jinfeng<sup>1</sup> WENG Wuxiong<sup>1</sup> LIU Junlin<sup>1</sup> WANG Jinwu<sup>1</sup> MO Yisong<sup>2</sup> NA Mingjun<sup>1</sup>

(1. College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China

2. Changzhou Hansen Machinery Co., Ltd., Changzhou 213033, China)

**Abstract:** Rice is one of the main grain crops in China. Improving the mechanization level of rice production can enhance the comprehensive agricultural production capacity of China. Solid ridge is important guarantee for irrigation and rice growth. It can improve the yield of grain crops and reduce the waste of water resources. In order to improve the efficiency and quality of ridging operation in paddy field, reducing the labor intensity and solving the problem that the ridge can not be built mechanically at the corner of the paddy field, a bi-directional ridger for paddy field was designed, whose rotary tillage and repression components can rotate horizontally. The structural design and working principle were conducted for key components, such as offset system and 180° horizontal rotary adjustment mechanism. Kinematic analysis of the offset system was carried out and the structural parameters of the moving parts were obtained, which satisfied the migration requirements under different working conditions. The motion model of the 180° horizontal rotary adjustment mechanism was established, the conditions for stabilizing the rotary tillage component and compacting assembly were determined. The performance test of the prototype in paddy field was completed. Test results showed that during the advance operation and reverse operation, the average value of the ridge firmness was increased with the increase of interval time and the coefficient of variation of the ridge firmness was decreased with the increase of the interval time when the speed was 1.5 km/h, 2.0 km/h and 2.3 km/h. The average value of the ridge side was higher than that of the top of ridge at the same interval time. The stability values of the measured positions of the ridge were not less than 1 332 kPa. The two methods of operation met the agronomic requirements of paddy fields and the performance of the ridger was stable in the process of advancing and reversing, its ridge had good quality, which was solid and smooth and could meet the requirement of paddy field production.

**Key words:** paddy field; ridger; rotary regulation; lateral deviation

收稿日期: 2018-08-10 修回日期: 2018-09-10

**基金项目:** 国家重点研发计划项目(2018YFD0300105-4、2017YFD0701105、2016YFD0300909-04)、黑龙江省高校青年创新人才培养计划项目(UNPYSCT-2016129)和东北农业大学学术骨干项目(16XG09)

**作者简介:** 王金峰(1981—),男,教授,博士生导师,主要从事田间机械研究,E-mail: jinfeng\_w@126.com

**通信作者:** 王金武(1968—),男,教授,博士生导师,主要从事田间机械及机械可靠性研究,E-mail: jinwu@163.com

## 0 引言

筑埂是实现水田淹灌的关键,坚实合理的田埂是水稻高产稳产的重要保证,可有效节约水资源,有利于我国标准化农田建设<sup>[1-4]</sup>。

国外对机械筑埂技术的研究起步较早,其中日本对该项技术的研究较为成熟,具有代表性的机具有小桥工业有限公司生产的 RKM 系列、佐佐木有限公司生产的 KN207 型以及松山有限公司生产的 CZR351 型水田单侧筑埂机,采用机电液等多项技术相结合的方式设计,能够实现作业部件的自动换向<sup>[5-7]</sup>,所修筑田埂笔直平整,坚实可靠,但上述筑埂机结构复杂,造价昂贵且维修不便,不适宜在国内推广。目前我国大多采用人工的方式修筑田埂,劳动强度大,作业效率低,修筑的田埂高低不平,易松垮倒塌,且需人工反复修筑。国内一些科研院所及中小企业也研制出一些筑埂机型,主要分为单侧筑埂与双侧筑埂两种形式<sup>[8-11]</sup>,但存在一定的局限性,无法对地头拐角处田埂进行修筑。现有文献中很少有关于倒行筑埂研究的报道,王金峰等<sup>[11]</sup>研制的 1SZ-800 型悬挂式水田单侧筑埂机虽然能实现作业部件的 180° 翻转,但翻转过程仍需人力推动协助进行,且翻转后锁定繁琐,加之整机过重,动力消耗大,影响机具使用的可靠性及经济性。

基于上述分析,本文结合东北地区水田筑埂农艺要求,设计一种旋耕和镇压部件具有 180° 水平回转功能的水田双向修筑埂机,对其结构及工作原理进行设计与分析,获取合理的机具结构参数。

## 1 水田筑埂农艺要求

筑埂机所筑田埂截面一般呈梯形,田埂高度为 250~300 mm,埂底宽度为 400~600 mm,埂顶宽度为 250~350 mm,土壤坚实度不小于 1 MPa,黑龙江省筑埂作业时间为每年 4 月中下旬或者 5 月上旬,取土后形成的沟槽深度不大于 200 mm。

## 2 整机结构与工作原理

### 2.1 整机结构

整机结构如图 1 所示,水田双向修筑埂机主要由悬挂牵引架、横向偏移机构、180° 水平回转调节机构、旋耕部件、镇压部件、耕深调节装置、挡土罩壳、尾轮以及传动系统组成。

其中主要作业部件包括 180° 水平回转调节机构、旋耕部件和镇压部件。旋耕部件置于相对 180° 水平回转调节机构的前部,实现旋切、碎土与集土等功能,镇压部件置于后部,能够压实土壤,筑埂成型。

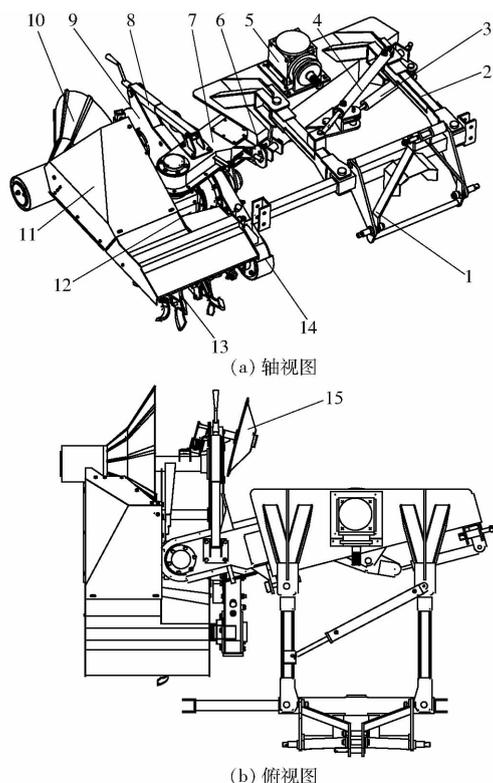


图 1 水田双向修筑埂机结构简图

Fig. 1 Structure diagrams of bi-directional ridger

1. 悬挂牵引架 2. 横向偏移机构 3. 双作用液压缸 II 4. 双作用液压缸 I 5. 主变速箱 6. 快速锁紧装置 7. 180° 水平回转调节机构 8. 耕深调节装置 9. 筑埂变速箱 10. 镇压部件 11. 挡土罩壳 12. 副变速箱 13. 旋耕部件 14. 旋耕变速箱 15. 尾轮

旋耕变速箱和筑埂变速箱固接于一体,可绕副变速箱进行定轴转动。180° 水平回转调节机构控制旋耕部件和镇压部件的 180° 水平回转及锁定。耕深调节装置可伸缩地连接在筑埂变速箱与 180° 水平回转调节机构之间,能够控制旋耕变速箱和筑埂变速箱的转动角度大小,改变取土深度及筑埂高度。通过在整机尾部安装尾轮抵消来自镇压部件的侧向力。横向偏移机构与 180° 水平回转调节机构上双作用液压缸 I、II 的油口均通过液压油管与拖拉机后置油口相连,利用拖拉机上的液压系统进行伸缩控制。

### 2.2 传动系统与工作原理

水田双向修筑埂机传动系统如图 2 所示,修筑埂机的动力由拖拉机后方的动力输出轴通过万向节连接至动力输入轴来提供,通过主变速箱变速后经过 180° 水平回转调节机构传递至副变速箱,再由副变速箱分配至旋耕变速箱及筑埂变速箱上驱动旋耕和镇压部件进行作业,旋耕部件和镇压部件转速比为 3:2,旋耕部件和动力输入轴转速比为 1:1。主变速箱与 180° 水平回转调节机构之间由轴承 I 进行铰接,副变速箱与旋耕变速箱之间由轴承 II 进行铰

接,保证 180°水平回转调节机构回转角度及旋耕部件取土作业深度改变后不会影响传动系统作业。

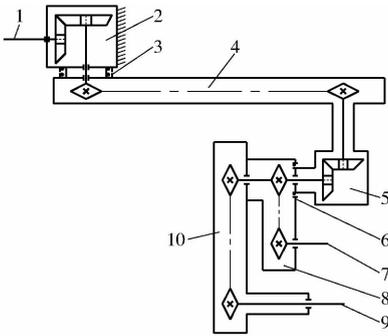


图2 水田双向修筑埂机传动系统示意图

Fig.2 Structure diagram of transmission system

1. 动力输入轴 2. 主变速箱 3. 轴承 I 4. 180°水平回转调节机构 5. 副变速箱 6. 轴承 II 7. 旋耕部件动力输入轴 8. 旋耕变速箱 9. 镇压部件动力输入轴 10. 筑埂变速箱

作业时,根据不同型号拖拉机的轮距控制横向偏移机构以调整修筑埂机的横向起始作业位置;按照水田旧埂修补或者原地起埂的要求,调节旋耕和镇压部件至理想作业位置。拖拉机行驶过程中,旋耕部件上的旋耕刀具高速旋转对土壤进行切削,并将土壤抛甩至机具侧后方区域,经由挡土罩壳将土堆汇聚至镇压部件的工作区域,通过镇压部件的旋转及弹性变形对聚拢的土堆进行拍打镇压,完成单侧田埂的修筑。而后拖拉机换向,沿着单侧田埂的轨迹反向行驶,修筑另一侧田埂。在拖拉机行驶到地头拐角处由于机身占用一段距离无法继续修筑田埂时,调整 180°水平回转调节机构完成旋耕和镇压部件从前行作业位置至倒行作业位置的 180°水平回转与锁定,拖拉机换向,以倒行的方式完成拐角处田埂的修筑作业。

### 3 关键部件设计

#### 3.1 触土部件

触土部件主要包括旋耕部件和镇压部件。作业时,旋耕部件进行取土抛土,镇压部件对汇聚的土堆进行镇压。二者协同作业实现筑埂成型。

旋耕部件由旋耕刀轴和不同类型弯刀<sup>[12-17]</sup>组成,结构如图 3 所示。在旋耕刀轴上安装取土弯刀、抛土弯刀和切型弯刀完成取土、抛土、切型功能,将旧田埂切成 3 个梯度级的阶梯状,有利于减小旋耕过程中受到的阻力,提高碎土效率。3 种类型弯刀组合可实现远处取土抛土,近处聚拢切型,为后续筑埂作业提供充足集土量。本文参考文献[8]选择取土弯刀、抛土弯刀和切型弯刀的回转半径分别为 270、230、145 mm。

镇压部件由层叠分布的折弯式弹片和镇压辊组

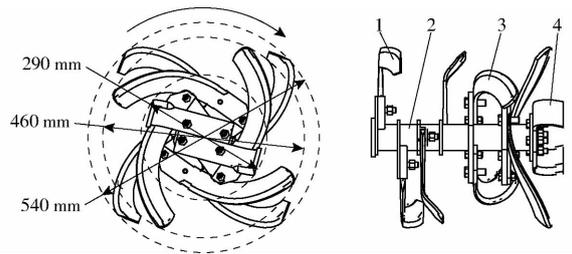


图3 旋耕部件示意图

Fig.3 Structure diagram of rotary tillage assembly

1. 取土弯刀 2. 旋耕刀轴 3. 抛土弯刀 4. 切型弯刀

成,各弹片按照回转方向形成前高后低的倾斜状态,相邻弹片间按照与土壤接触的有效作业区域分为接触面区域与非接触面区域<sup>[18-20]</sup>,结构如图 4 所示。作业过程中,弹片的振动压实与镇压辊的静力压实相结合,对埂顶及埂侧同时进行推压夯实,筑埂成型。本文参考文献[10]选择镇压部件的结构参数:镇压辊直径 180 mm,镇压部件外圆直径 800 mm,弹片厚度 4 mm,单个弹片弯折角度 150°。

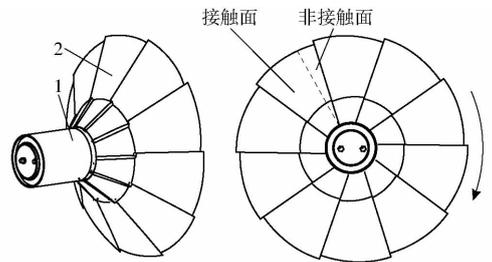


图4 镇压部件示意图

Fig.4 Structure diagram of compacting assembly

1. 镇压辊 2. 弹片

#### 3.2 横向偏移机构

横向偏移机构连接于机具悬挂牵引架与作业部件之间,可控制作业部件左右横摆距离,整体结构如图 5 所示,主要由悬挂连杆、球叉式万向节、平行摆臂、双作用液压缸 I 及支撑架组成。平行摆臂两端分别与悬挂连杆及支撑架铰接,形成平行四边形,双作用液压缸 I 两头分别与平行摆臂及支撑架铰接。

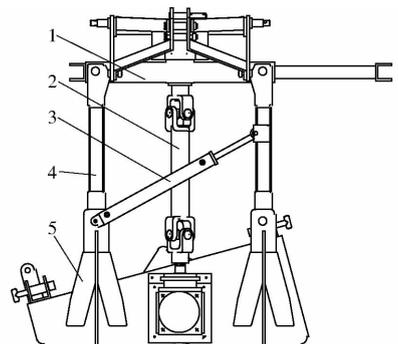


图5 横向偏移机构示意图

Fig.5 Structure diagram of offset system

1. 悬挂连杆 2. 球叉式万向节 3. 双作用液压缸 I 4. 平行摆臂 5. 支撑架

作业前后调整横向偏移机构可适应不同作业状况,提高机具的通用性。在拖拉机前行作业时,可保证拖拉机车轮不碾压到旧埂;在拖拉机倒行作业时,可避免拖拉机一侧车轮碾入旋耕部件取土后遗留在已耕地上的沟槽中;在完成单侧田埂修筑后,驾驶员更易于在拖拉机驾驶室中对偏移距离进行控制,使旋耕和镇压部件快速靠近埂边对准埂面,进行另一侧田埂的修筑,保证所筑田埂左右两侧对称;在运输过程中,可改变机具重心位置保证运输状态工作平稳。横向偏移机构作业效果如图6所示,其中 $L_1$ 为前行作业时拖拉机右侧轮胎与田埂之间的距离, $L_2$ 为倒行作业时拖拉机左侧轮胎与田埂之间的距离。

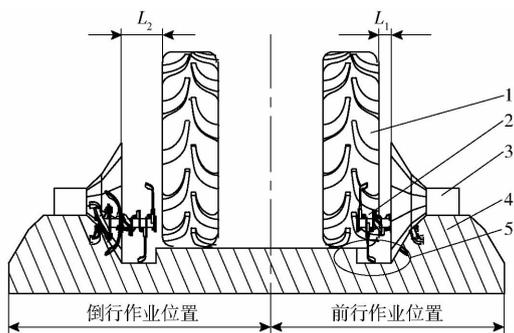


图6 横向偏移机构作业效果示意图

Fig. 6 Working effect diagram of offset system

1. 拖拉机轮胎 2. 旋耕部件 3. 镇压部件 4. 田埂 5. 沟槽

对横向偏移机构偏移运动进行分析,运动简图如图7所示。

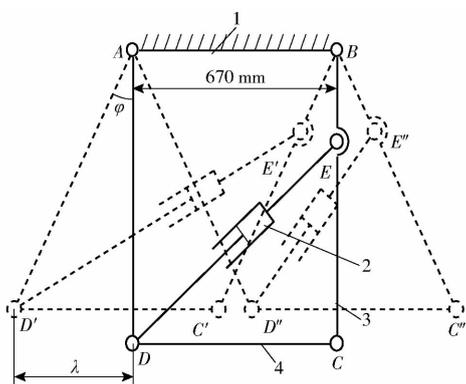


图7 横向偏移机构运动简图

Fig. 7 Kinematic sketch of offset system

1. 悬挂连杆 2. 双作用液压缸 I 3. 平行摆臂 4. 支撑架

$A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$ 、 $E$  为各个铰连点,  $C'$ 、 $D'$ 、 $E'$ 、 $C''$ 、 $D''$ 、 $E''$  为向左和向右偏移至极限位置时铰连点所在位置。在调节过程中,横向偏移机构活动构件数量为5个,各铰连点以及移动副均为低副,共7个,分析计算该机构的整体自由度为1,满足机械运动要求,可进行横向偏移运动。当双作用液压缸 I 的推杆位置锁定时,该机构活动构件数量为4个,低副连接为6个,机构整体自由度为0,实现刚性连接进行筑埂

作业。根据51.5~66.2 kW 拖拉机下拉杆位置设计悬挂连杆长度 $l_{AB}$ 为670 mm,由各构件的几何关系可求得平行摆臂的长度 $l_{BC}$ 为

$$l_{BC} = \frac{\lambda}{\sin\varphi} \quad (1)$$

式中  $\lambda$ ——横向偏移机构最大可调横向距离,mm  
 $\varphi$ ——横向偏移机构最大可调节角度,(°)

为适应不同作业工况,根据拖拉机轮距尺寸以及修筑埂机旋耕和镇压部件与拖拉机轮胎之间的距离,确定横向偏移机构最大可调节横向距离 $\lambda$ 为370 mm。由图5可知,悬挂连杆与支撑架之间由球叉式万向节进行动力传递,由于球叉式万向节最大工作偏角为 $33^\circ$ ,为保证球叉式万向节工作平稳,设计其工作偏角比最大工作偏角小 $5^\circ$ ,即设计球叉式万向节工作偏角 $\varphi$ 为 $28^\circ$ 。由式(1)可求得平行摆臂长度 $l_{BC}$ 为788 mm。为确定铰连点 $E$ 在平行摆臂上所处位置,根据悬挂连杆长度、平行摆臂长度和拖拉机轮距选择行程为400 mm的标准双作用液压缸 I,安装距最长为1 020 mm,最短为620 mm。当横向偏移机构往左偏移至极限位置时,在 $\triangle D'C'E'$ 中由余弦定理可得

$$\cos\left(\frac{\pi}{2} + \varphi\right) = \frac{l_{CD}^2 + l_{CE}^2 - l_{D'E'}^2}{2l_{CD}l_{CE}} \quad (2)$$

当横向偏移机构往右偏移至极限位置时,在 $\triangle D''C''E''$ 中由余弦定理可得

$$\cos\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right) = \frac{l_{CD}^2 + l_{CE}^2 - l_{D''E''}^2}{2l_{CD}l_{CE}} \quad (3)$$

将最短安装距作为 $l_{D''E''}$ 代入式(3)可得 $l_{CE}$ 为500 mm,将 $l_{CE}$ 的值代入式(2)求得 $l_{D'E'}$ 为1 007 mm,小于最大安装距(1 020 mm),说明所选择双作用液压缸 I 在满足偏移条件的情况下, $E$ 点选择在平行摆臂上距离 $B$ 点288 mm处较为合适。

### 3.3 180°水平回转调节机构

#### 3.3.1 结构特点与工作原理

180°水平回转调节机构由双作用液压缸 II、连杆、支撑架、快速锁紧装置、链传动箱、滑槽和滑块组成,主要用于控制旋耕和镇压部件在水平方向上的180°回转及锁定,实现前行与倒行两种作业方式的快速转换,结构如图8所示。

其中在支撑架上分别铰连双作用液压缸 II 和连杆,连杆的一端与双作用液压缸 II 铰接,在链传动箱上设置滑槽,滑块可移动地配装在滑槽内,连杆的另一端可转动地插入配装在滑块中心孔内。筑埂作业时,快速锁紧装置处于锁死状态,当需要切换作业方式时,解开快速锁紧装置,控制双作用液压缸 II 的伸缩量,驱动连杆在支撑架上转动,连杆带动滑块在滑

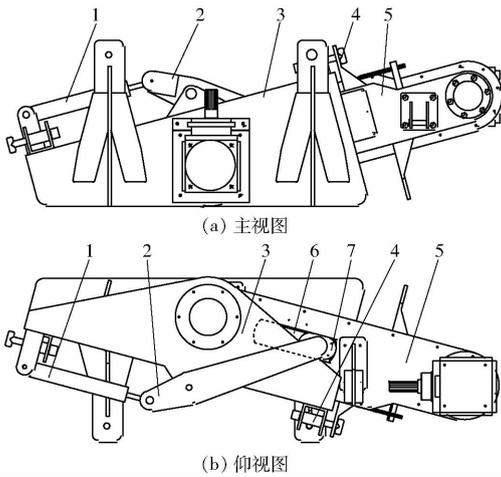


图8 180°水平回转调节机构示意图

Fig. 8 Structure diagram of 180° horizontal rotary adjustment mechanism

1. 双作用液压缸Ⅱ 2. 连杆 3. 支撑架 4. 快速锁紧装置  
5. 链传动箱 6. 滑槽 7. 滑块

槽内移动,实现旋耕和镇压部件的180°水平回转,再由快速锁紧装置进行锁定,完成水田双向修筑埂机作业方式的快速转换。

### 3.3.2 结构设计与分析

为保证旋耕和镇压部件前行与倒行作业方向处在一条直线上,并且使回转过程趋于平稳,需确定滑槽长度及链传动箱的角速度。因此,对180°水平回转调节机构进行运动学分析,如图9所示。

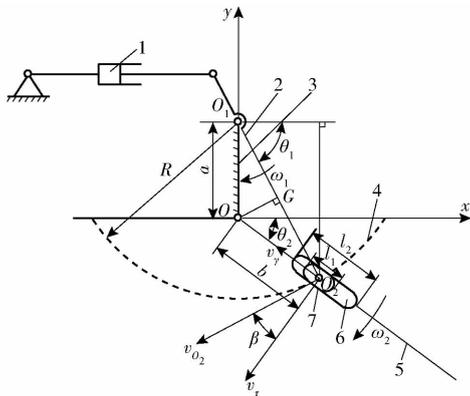


图9 180°水平回转调节机构运动简图

Fig. 9 Kinematic sketch of 180° horizontal rotary adjustment mechanism

1. 双作用液压缸Ⅱ 2. 连杆 3. 支撑架 4. 滑块中心轨迹  
5. 链传动箱 6. 滑槽 7. 滑块

以O点为原点建立平面直角坐标系,其中连杆绕O<sub>1</sub>点转动,θ<sub>1</sub>为连杆回转角,链传动箱绕O点转动,θ<sub>2</sub>为链传动箱回转角,a为中心距,R为滑块中心点O<sub>2</sub>绕O<sub>1</sub>点的转动半径,且R>a,b为滑块中心点O<sub>2</sub>与原点O之间的距离。

在△O<sub>1</sub>OO<sub>2</sub>中由余弦定理推导出b为

$$b = \sqrt{a^2 + R^2 - 2aR\sin\theta_1} \quad (4)$$

旋耕和镇压部件进行180°水平回转切换作业方式,要求θ<sub>2</sub>∈[0,π],由式(4)分析可知,链传动箱回转过程中b在此范围内先减小后增大,当θ<sub>1</sub>=π/2时,存在最小值b<sub>min</sub>为

$$b_{\min} = R - a \quad (5)$$

由图9可知,当θ<sub>2</sub>=0或θ<sub>2</sub>=π时,△O<sub>1</sub>OO<sub>2</sub>为直角三角形,求得θ<sub>1</sub>=arcsin(a/R),此时存在最大值b<sub>max</sub>为

$$b_{\max} = \sqrt{R^2 - a^2} \quad (6)$$

b<sub>max</sub>与b<sub>min</sub>决定了滑块的移动范围,因此链传动箱上设置的滑槽长度l<sub>2</sub>为

$$l_2 = \sqrt{R^2 - a^2} - (R - a) + l_1 \quad (7)$$

式中 l<sub>1</sub>——滑块长度,mm

滑块在滑槽长度l<sub>2</sub>范围内往复运动,根据滑块中心轴承尺寸确定滑块长度l<sub>1</sub>为120mm。由180°水平回转调节机构的整体结构可知铰连点O<sub>1</sub>应设置在支撑架上主变速箱的安装范围外,根据所选主变速箱底座安装尺寸(290mm×310mm)可知中心距a应不小于240mm。如图8所示,滑槽设置在链传动箱上,为保证旋耕与镇压部件的安装空间,b<sub>max</sub>的长度应不大于370mm。

回转过程中,连杆以角速度ω<sub>1</sub>匀速转动,顺时针转动为正,偏心率为e,则

$$e = \frac{a}{R} \quad (8)$$

为保证链传动箱运动平稳,需确定链传动箱角速度ω<sub>2</sub>。将连杆在O<sub>2</sub>点的速度v<sub>o2</sub>分解成垂直于链传动箱的速度v<sub>τ</sub>和滑块的移动速度v<sub>γ</sub>进行分析,连杆在O<sub>2</sub>点的速度v<sub>o2</sub>与连杆方向垂直,则

$$\cos\beta = \frac{v_\tau}{v_{o_2}} \quad (9)$$

其中  $v_\tau = \frac{\omega_2 b}{1000}$   $v_{o_2} = \frac{\omega_1 R}{1000}$

式中 β——连杆在O<sub>2</sub>点的速度v<sub>o2</sub>与链传动箱在O<sub>2</sub>点的速度v<sub>τ</sub>之间的夹角,(°)

ω<sub>2</sub>——链传动箱角速度,rad/s

由直角三角形△OGO<sub>2</sub>几何关系可得

$$\cos\beta = \frac{R - a\sin\theta_1}{b} \quad (10)$$

将式(4)、(9)代入式(10),结合式(8)可得链传动箱的角速度ω<sub>2</sub>为

$$\omega_2 = \frac{(1 - e\sin\theta_1)\omega_1}{1 + e^2 - 2e\sin\theta_1} \quad (11)$$

对式(11)两边同时求导可得链传动箱的角加

速度  $\varepsilon$  为

$$\varepsilon = \frac{\omega_1^2 e (1 - e^2) \cos \theta_1}{(1 + e^2 - 2e \sin \theta_1)^2} \quad (12)$$

根据式(12)对一元函数求最值,当角加速度  $\varepsilon$  为零时,求得连杆回转角  $\theta_1$  为  $\frac{\pi}{2}$ ,链传动箱回转过程中先加速后减速,链传动箱最大角速度  $\omega_{2\max}$  出现在连杆与  $y$  轴负方向重合处,即

$$\omega_{2\max} = \frac{\omega_1}{1 - e} \quad (13)$$

由式(13)可知,链传动箱最大角速度  $\omega_{2\max}$  与偏心率  $e$ 、连杆角速度  $\omega_1$  有关,减小偏心率  $e$  与连杆角速度  $\omega_1$  能降低链传动箱角速度  $\omega_2$ 。由式(8)可知,减小  $a$  或者增大  $R$  均可减小偏心率  $e$ 。为了得到  $e$  的最小值,  $a$  取最小值 240 mm,为保证  $b_{\max}$  不大于 370 mm,将  $a$  代入式(6)中求得  $R$  最大值为 441 mm,将  $a$  与  $R$  的值代入式(7)中确定滑槽长度  $l_2$  为 289 mm,此时偏心率  $e$  为 0.54。作业时,连杆由双作用液压缸 II 进行驱动,通过在双作用液压缸 II 进口口处安装单向节流阀控制液压油流量,减小连杆角速度  $\omega_1$ ,使回转过程趋于平稳。

#### 4 试验结果与分析

黑龙江地区主要耕作土壤类型有黑土、草甸土和白浆土。为确定水田双向修筑埂机成埂所需土壤含水率条件,在黑龙江不同土壤含水率的地块上进行筑埂作业。研究表明:3 种类型土壤含水率在 23% ~ 30% 范围内成埂效果良好。当含水率过低时,机具取土过程中土壤无法汇聚;当含水率过高时,机具作业时土壤易被旋耕和镇压部件甩出,无法镇压成型。水田双向修筑埂机在不同含水率地块上的作业效果如图 10 所示。



图 10 不同含水率下的作业效果

Fig. 10 Working effect of bi-directional ridger under different soil water contents

为检测水田双向修筑埂机所修筑田埂的质量,于 2018 年 5 月 3 日在黑龙江省哈尔滨市呼兰区许堡乡郎堡村农业农村部水稻万亩高产示范基地进行田间作业性能试验。田间环境温度 17℃,环境相对湿度 59%,风力 3 ~ 4 级,田间试验所选地块土壤坚实度 180 ~ 210 kPa,土壤含水率 24% ~ 25%,配套动

力为东方红 LX904 型拖拉机。田埂坚实度是保证水田蓄水能力的关键因素,直接影响水稻的产量。因此,本试验选取田埂坚实度作为田埂质量的评价指标,田埂坚实度的平均值及变异系数计算式为

$$\bar{Q} = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i}{n} \quad (14)$$

$$V = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2}{n - 1}} \times 100\% \quad (15)$$

式中  $\bar{Q}$ ——田埂坚实度平均值, kPa  
 $Q_i$ ——第  $i$  点田埂坚实度测量值, kPa  
 $n$ ——田埂坚实度测量次数  
 $V$ ——田埂坚实度变异系数, %

由文献[10]可知,机具作业速度与工作转速是影响田埂坚实度的主要因素。因此,本文控制拖拉机动力输出轴转速为 540 r/min,进行不同作业速度的前行与倒行田间作业性能试验,分析田埂坚实度随时间的变化情况。前行作业时,拖拉机依次挂低速 I 挡、低速 II 挡和低速 III 挡(油门控制在 90% 左右),将作业速度分别控制在 1.5、2.3、2.8 km/h,作业过程中发现,作业速度为 2.8 km/h 时机具无法筑埂成型;倒行作业时,挂倒车 I 挡,若将油门控制在 90% 左右作业速度将达到 2.7 km/h 左右,机具无法筑埂成型,因此将作业速度控制在 2.0 km/h 左右(油门控制在 60% 左右)进行筑埂作业。试验时,对水田双向修筑埂机进行调试,按照作业方式调整横向偏移机构及 180° 水平回转调节机构至起始作业状态,根据原地起埂作业要求调节旋耕部件作业深度至 200 mm 以确保作业所需集土量,保证机具有效作业距离为 15 m 以上,作业效果如图 11 所示。

筑埂作业完成后立即测量田埂坚实度,沿所筑田埂方向每间隔 3 m 进行标识,在同一截面内的田埂两侧和埂顶位置对坚实度进行测量,测量位置如图 12 所示,每个时间点选取 5 个截面,累计测量 15 个点,并在之后每间隔 1 h 测量一次,共测量 9 个时间点,观察田埂坚实度的变化情况。

按式(14)、(15)分别计算不同作业速度及筑埂后不同间隔时间下田埂坚实度的平均值和变异系数,计算结果如表 1 所示。

根据表 1 中的测试数据,得到不同作业速度下,筑埂后间隔时间与田埂坚实度平均值、坚实度变异系数的关系曲线,如图 13 所示。

由图 13 可知,水田双向修筑埂机前行与倒行筑埂作业效果良好。当作业速度分别为 1.5、2.0、



(a) 试验机具



(b) 前行作业效果

(c) 倒行作业效果

图 11 双向修筑埂机田间试验

Fig. 11 Field test of bi-directional ridger

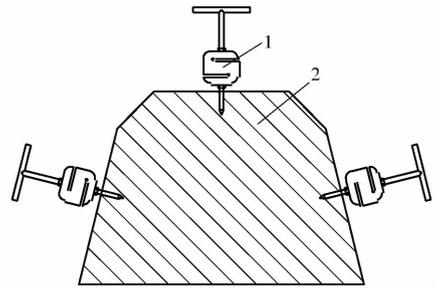


图 12 测量位置示意图

Fig. 12 Diagram of surveying position

1. 土壤硬度计 2. 田埂

间的增大而增大,田埂坚实度变异系数随着筑埂后间隔时间的增大而减小,在筑埂 6 h 后各测量位置田埂坚实度平均值趋于稳定。间隔时间相同时,埂侧坚实度平均值比埂顶高,由于筑埂过程中埂顶主要由镇压辊进行滚动压实,而埂侧由多个弹片进行拍打压实,弹片之间的叠加形式增大了对土壤的碾压压力,从而增大埂侧坚实度。作业速度不同时,相同

2.3 km/h时,田埂坚实度平均值随着筑埂后间隔时

表 1 双向修筑埂机田间作业坚实度检测结果

Tab. 1 Performance test results of bi-directional ridger

作业方式	作业速度/ (km·h <sup>-1</sup> )	间隔时间/ h	测量位置					
			埂左侧		埂顶		埂右侧	
			平均值/kPa	变异系数/%	平均值/kPa	变异系数/%	平均值/kPa	变异系数/%
前行	1.5	0	670	7.78	500	8.48	634	7.37
		1	866	7.13	602	7.12	752	7.35
		2	1 248	7.35	778	6.96	1 238	7.28
		3	1 706	5.51	994	6.28	1 796	6.19
		4	2 086	5.30	1 028	5.59	2 140	5.45
		5	2 248	4.19	1 254	5.17	2 262	4.70
		6	2 452	4.35	1 388	4.58	2 354	4.36
		7	2 440	4.27	1 332	4.64	2 428	4.46
前行	2.3	8	2 426	4.19	1 398	4.22	2 430	4.78
		0	552	8.16	338	8.50	470	8.20
		1	710	8.27	486	8.18	788	8.09
		2	1 120	7.55	774	7.52	1 112	7.04
		3	1 520	7.17	862	7.20	1 630	6.50
		4	1 884	6.64	1 020	6.92	1 854	7.13
		5	2 176	5.30	1 184	5.51	2 010	5.45
		6	2 358	4.94	1 356	5.4	2 396	5.08
倒行	2.0	7	2 382	4.46	1 390	5.01	2 414	4.85
		8	2 312	4.33	1 414	4.48	2 446	4.61
		0	506	8.65	430	8.61	544	8.04
		1	680	8.13	552	8.09	662	8.57
		2	996	8.18	700	8.34	1 016	8.32
		3	1 574	7.60	882	7.73	1 574	7.67
		4	1 878	7.43	1 014	7.52	1 770	7.55
		5	2 116	6.19	1 104	7.29	1 910	6.41
倒行	2.0	6	2 358	6.17	1 360	6.50	2 400	5.65
		7	2 324	5.51	1 432	5.69	2 390	4.53
		8	2 388	4.94	1 368	5.49	2 420	4.66

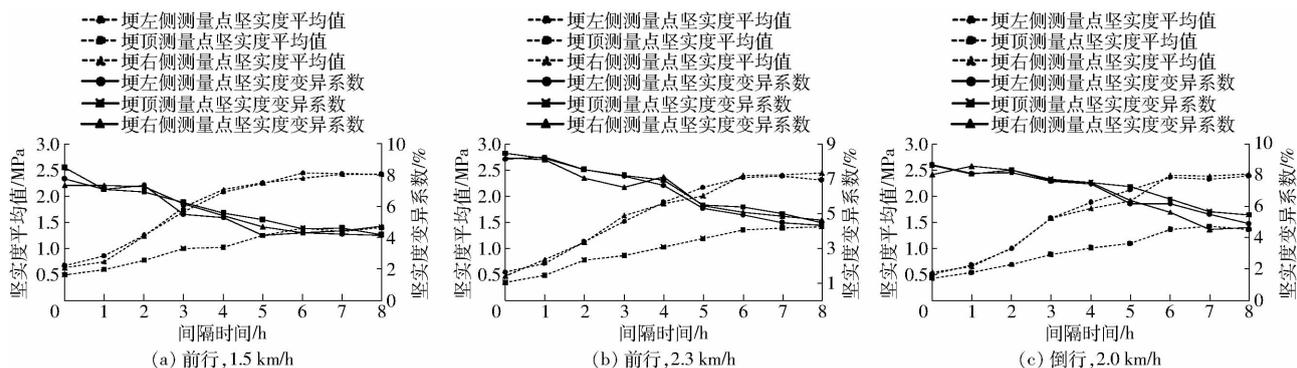


图 13 不同作业速度下田埂坚实度平均值、坚实度变异系数与间隔时间关系曲线

Fig. 13 Relationship curves between coefficient of variation of average rigidity and firmness at different operating speeds

测量位置的稳定值基本一致,埂顶坚实度平均值均不低于 1 332 kPa,埂侧坚实度平均值均不低于 2 312 kPa。风力、温度、湿度等环境因素影响所修筑田埂的坚实度,因此,在筑埂后不适合立即进行泡田作业。

## 5 结论

(1)设计了一种水田双向修筑埂机,能够通过旋耕和镇压部件的 180°水平回转,以前行和倒行两种方式进行筑埂作业,适用于原地起埂与旧埂修补。

(2)对双向修筑埂机的关键部件进行设计与分析,通过建立横向偏移机构与 180°水平回转调节机构的运动模型,确定了平行摆臂长度为 788 mm,偏

心率为 0.54,滑槽长度为 289 mm。横向偏移机构的左右横摆与 180°水平回转调节机构的回转提高了筑埂机具的通用性。

(3)由田间试验可知,当作业速度分别为 1.5、2.0、2.3 km/h 时,田埂坚实度平均值随着筑埂后间隔时间的增大而增大,田埂坚实度变异系数随着筑埂后间隔时间的增大而减小,筑埂后一段时间,坚实度平均值趋于稳定;间隔时间相同时,埂侧坚实度平均值高于埂顶,田埂各测量位置稳定值均不低于 1 332 kPa。

(4)作业速度不同时,相同测量位置的稳定值基本一致。水田双向修筑埂机以前行与倒行两种作业方式所修筑田埂均满足筑埂农艺要求。

## 参 考 文 献

- [1] 李泽华,马旭,李秀昊,等.水稻栽植机械化技术研究进展[J/OL].农业机械学报,2018,49(5):1-20.  
LI Zehua, MA Xu, LI Xiuhao, et al. Research progress of rice transplanting mechanization[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5): 1-20. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20180501&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180501&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.05.001. (in Chinese)
- [2] 左兴建,武广伟,付卫强,等.风送式水稻侧深精准施肥装置的设计与试验[J].农业工程学报,2016,32(8):14-21.  
ZUO Xingjian, WU Guangwei, FU Weiqiang, et al. Design and experiment on air-blast rice side deep precision fertilization device[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(8): 14-21. (in Chinese)
- [3] 李海龙,刘刚,陈孟超,等.我国水稻生产机械化技术探析[J].农业科技与装备,2014,12(12):38-39.  
LI Hailong, LIU Gang, CHEN Mengchao, et al. Discussion on the technique of rice production mechanization in China[J]. Agricultural Science & Technology and Equipment, 2014, 12(12): 38-39. (in Chinese)
- [4] 罗锡文,王在满.水稻生产全程机械化技术研究进展[J].现代农业装备,2014(1):23-29.
- [5] 李英,张越杰.日本水稻生产效率的实证分析[J].吉林农业大学学报,2011,33(2):227-230.  
LI Ying, ZHANG Yuejie. An empirical study of efficiency of rice production in Japan[J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2011, 33(2): 227-230. (in Chinese)
- [6] 李耀明,徐立章,向忠平,等.日本水稻种植机械化技术的最新研究进展[J].农业工程学报,2005,21(11):182-185.  
LI Yaoming, XU Lizhang, XIANG Zhongping, et al. Research advances of rice planting mechanization in Japan[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(11): 182-185. (in Chinese)
- [7] 关振君.DTZG-01型稻田筑埂机的设计研究[J].农业科技与装备,2011(10):20-22.  
GUAN Zhenjun. Design of DTZG-01 paddy field ridger[J]. Agricultural Science and Technology and Equipment, 2011(10): 20-22. (in Chinese)
- [8] 王金武,唐汉,王金峰,等.1DSZ-350型悬挂式水田单侧旋耕镇压修筑埂机的设计与试验[J].农业工程学报,2017,33(1):25-37.  
WANG Jinwu, TANG Han, WANG Jinfeng, et al. Design and experiment on 1DSZ-350 type hanging unilateral rotary tillage compacting ridger for paddy field[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(1): 25-37. (in Chinese)

- [9] 王金武,唐汉,王金峰,等.悬挂式水田单侧修筑埂机数值模拟分析与性能优化[J/OL].农业机械学报,2017,48(8):72-80.  
WANG Jinwu, TANG Han, WANG Jinfeng, et al. Numerical analysis and performance optimization experiment on hanging unilateral ridger for paddy field [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(8):72-80. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20170807&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170807&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.08.007. (in Chinese)
- [10] 王金峰,林南南,王金武,等.单侧筑埂机镇压筑埂装置工作动力学参数测试与试验[J/OL].农业机械学报,2017,48(8):81-86,104.  
WANG Jinfeng, LIN Nannan, WANG Jinwu, et al. Design and experiment on working dynamics parameters of single-side ridger [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(8):81-86,104. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20170808&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170808&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.08.008. (in Chinese)
- [11] 王金峰,王金武,孔彦军,等.悬挂式水田筑埂机及其关键部件研制与试验[J].农业工程学报,2013,29(6):28-34.  
WANG Jinfeng, WANG Jinwu, KONG Yanjun, et al. Development and experiment of suspension ridger and its key components for paddy field [J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(6):28-34. (in Chinese)
- [12] 吕金庆,尚琴琴,杨颖,等.马铃薯杀秧机设计优化与试验[J/OL].农业机械学报,2016,47(5):106-114.  
LÜ Jinqing, SHANG Qinqin, YANG Ying, et al. Design optimization and experiment on potato haulm cutter [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(5):106-114. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20160515&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160515&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.05.015. (in Chinese)
- [13] 贾洪雷,姜鑫铭,郭明卓,等.V-L型秸秆粉碎还田刀片设计与试验[J].农业工程学报,2015,31(1):28-33.  
JIA Honglei, JIANG Xinming, GUO Mingzhuo, et al. Design and experiment of V-L shaped smashed straw blade [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(1):28-33. (in Chinese)
- [14] 王金武,王奇,唐汉,等.水稻秸秆深埋整秆还田装置设计与试验[J/OL].农业机械学报,2015,46(9):112-117.  
WANG Jinwu, WANG Qi, TANG Han, et al. Design and experiment of rice straw deep buried and whole straw returning device [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(9):112-117. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20150916&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150916&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.09.016. (in Chinese)
- [15] 郑侃,何进,李洪文,等.反旋深松联合作业耕整机设计与试验[J/OL].农业机械学报,2017,48(8):61-71.  
ZHENG Kan, HE Jin, LI Hongwen, et al. Design and experiment of combined tillage implement of reverse-rotary and subsoiling [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(8):61-71. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20170806&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170806&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.08.006. (in Chinese)
- [16] 车刚,张伟,万霖,等.基于灭茬圆盘驱动旋耕刀多功能耕整机设计与试验[J].农业工程学报,2012,28(20):34-40.  
CHE Gang, ZHANG Wei, WAN Lin, et al. Design and experiment of multifunctional tillage machine with driven bent blade by stubble ploughing disk [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(20):34-40. (in Chinese)
- [17] 贾洪雷,黄东岩,刘晓亮,等.耕作刀片在刀辊上的多头螺旋线对称排列法[J].农业工程学报,2011,27(4):111-116.  
JIA Honglei, HUANG Dongyan, LIU Xiaoliang, et al. Symmetrical multi-spiral arrangement of tillage blades on rotor [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(4):111-116. (in Chinese)
- [18] MORRISON J E. Compatibility among three tillage systems and types of plant press wheels and furrow openers for verti-sol claysoils [J]. Applied Engineering in Agriculture, 2002, 18(3):293-295.
- [19] MALLEY D F, MCCLURE C, MARTIN P D. Compositional analysis of cattlemanure during composting using a field portable near infrared spectrometer [J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2005, 36(4):455-476.
- [20] 赵振家,邹猛,薛龙,等.压实对土壤应力分布的影响仿真分析[J/OL].农业机械学报,2012,43(增刊):311-313,338.  
ZHAO Zhenjia, ZOU Meng, XUE Long, et al. Simulation analysis of effect of compaction on soil stress distribution [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(Supp.):311-313,338. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=2012s63&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2012s63&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.S0.063. (in Chinese)